

**Р.П. МИГУЩЕНКО**, канд. техн. наук,  
**В.К. ГУСЕЛЬНИКОВ**, канд. техн. наук, проф.,  
**О.Ю. ВАЛУЙСКАЯ** (г. Харьков)

# **КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ЧИСЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

В статті приведені результати досліджень стану форсунки дизель-генераторної установки на основі чисельних характеристик процесу зміни амплітуди вібрації трубки паливного насоса високого тиску під дією відкриття (закривання) клапану форсунки у часі. Розроблена класифікація стану форсунки. Проаналізована похибка класифікації при імітаційному моделюванні та при натурних випробуваннях на одномоторному стенді дизель-генератора.

Безразборная диагностика состояния дизельной аппаратуры в целом и отдельных ее элементов в частности имеет большое значение для отечественного машиностроения. Указанная диагностика позволяет производить контроль дизель-генераторной установки (ДГУ) в потоке, чем существенно повышает технико-экономические показатели. Настоящая статья касается вопросов безразборной диагностики форсунок – одним из основных элементов ДГУ.

В [1] представлены результаты исследования состояния форсунок ДГУ по сигналам давления топлива и вибрации трубки топливного насоса высокого давления (ТНВД). В [1] был выделен доминирующий признак, на основании которого возможна качественная оценка пригодности форсунки ДГУ для дальнейшей эксплуатации. Таким признаком является существенное увеличение амплитуды выходного сигнала измерительного канала в моменты открытия и закрытия клапана форсунки. Однако переход от качественной оценки пригодности форсунки к количественной связано со многими факторами, которые нуждаются в дополнительных исследованиях.

Существенное увеличение амплитуды выходного сигнала  $y_i$  в момент открытия или закрытия клапана указывает на пригодность форсунки к дальнейшей эксплуатации. Однако в условиях естественного «старения» форсунки ее технические параметры способны заметно ухудшаться и амплитуда  $y_i$  может варьироваться в довольно-таки широких пределах. На сколько же должна возрасти амплитуда и где тот порог по амплитуде, выше которого можно считать, что форсунка является годной и ниже которого – негодной, остается неисследованным. Определению погрешности классификации форсунок по принципу «годен-негоден» относительно порогового значения амплитуды выходного сигнала измерительного канала посвящена данная статья.

Полученная после статистической обработки реализация изменения вибрации ТНВД  $\zeta(t)$  является случайным процессом, который, с одной стороны, адекватен реальному процессу, т.к. получен экспериментальным путем, с другой стороны, более информативен для изучения поведения объекта контроля. Случайный процесс  $\zeta(t)$  несет в себе информацию о трех, по меньшей мере, состояниях объекта контроля, требующих или не требующих активного разрушающего вмешательства в топливopодающую систему дизель-генератора:

- объект контроля исправен, замена форсунки не требуется,
- объект контроля неисправен, требуется срочная замена форсунки для обеспечения нормального функционирования устройства,
- однозначное решение вопроса о пригодности форсунки для дальнейшей эксплуатации принято быть не может.

Классификация перечисленных состояний контролируемого объекта приводит к модели принятия решений в пространстве одного информационного признака –  $\zeta_m$ . В этом пространстве можно выделить три области принятия решений (см. рис.):

- А – область нормального функционирования форсунки,
- В – область ненормального функционирования форсунки,
- С – спорная область, в которой сложно отдать предпочтение одному из двух решений (годен или негоден). Ширина этой области определяется погрешностью полученной информации в условиях интенсивных помех, которые возникают в производственных условиях при осуществлении проверки функционирования ДГУ, а также размытостью функционального состояния форсунки при естественном переходе из исправного состояния в неисправное. Конечная цель процедур контроля текущего состояния – установление, с некоторой доверительной вероятностью  $P_d$ , принадлежности рабочей точки к одной из трех областей А, В или С.

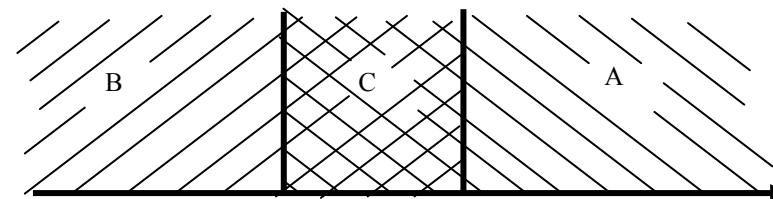


Рис. – Классификация состояния объекта контроля в пространстве информационного признака

Для проверки предположений о принадлежности выборки  $[\zeta(t_1), \zeta(t_N)]$  значений процесса  $\zeta(t)$  на интервале  $(0;t)$  области А, В или С используем критерий максимального правдоподобия, согласно которому принимается то

из решений  $\gamma_j$ ,  $j=1 \div 3$ , для которого функция правдоподобия выборки  $W_\Phi(\zeta/S_j)$ , больше других функций правдоподобия  $W_\Phi(\zeta/S_k)$ ,  $k \neq j$  [2]. При этом символом  $S_j$  обозначим состояние объекта:

- $j=1$ , если С,

- $j=2$ , если В,

- $j=3$ , если А.

Считая

$$\zeta(t) = \zeta \sim G(\bar{\zeta}),$$

а именно, что процесс  $\zeta(t)$  имеет вид нормального распределения, получим:

$$W_\Phi\left(\frac{\zeta}{S_j}\right) = \prod_j \frac{1}{\sigma_{\zeta j} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\zeta(t_i) - \bar{\zeta}}{\sigma_{\zeta j}}\right)^2\right\},$$

где  $\sigma_\zeta$  – среднеквадратическое отклонение (СКО),

В качестве СКО  $\sigma_{\zeta j}$  используем:

$$\sigma_{\zeta 1} = \sigma_c,$$

$$\sigma_{\zeta 2} = \sigma_H(\bar{\zeta}),$$

$$\sigma_{\zeta 3} = \sigma_B(\bar{\zeta}),$$

где  $\sigma_B$  – верхняя граница области С (см. рис.),

$\sigma_H$  – нижняя граница области С,

$\sigma_c$  – СКО процесса  $\zeta(t)$  в области С.

Вероятность ошибки, которая может возникнуть из-за неправильной классификации двух соседних состояний  $S_1$ - $S_2$  или  $S_1$ - $S_3$ , найдем, применяя критерий отношения правдоподобия, логарифм, который для пары  $S_1$ - $S_2$  имеет вид [2]:

$$\ln L[\zeta(t_1), \dots, \zeta(t_N)] = N \ln \frac{\sigma_{\zeta 1}}{\sigma_{\zeta 2}} - \frac{1}{Z} \left( \frac{1}{\sigma_{\zeta 2}^2} - \frac{1}{\sigma_{\zeta 1}^2} \right) \sum_{i=1}^N [\zeta(t_i) - \bar{\zeta}]^2, \quad (1)$$

где  $N$  – количество точек отсчета процесса  $\zeta(t)$ .

Для пары  $S_1$ - $S_3$  имеем аналогично:

$$\ln L[\zeta(t_1), \dots, \zeta(t_N)] = N \ln \frac{\sigma_{\zeta 1}}{\sigma_{\zeta 3}} - \frac{1}{Z} \left( \frac{1}{\sigma_{\zeta 3}^2} - \frac{1}{\sigma_{\zeta 1}^2} \right) \sum_{i=1}^N (\zeta(t_i) - \bar{\zeta})^2. \quad (2)$$

Условные вероятности ошибок первого и второго рода при использовании отношений (1, 2) можно найти, если известны условные плотности распределений суммы квадратов разностей в правых частях этих уравнений. Обозначим:

$$u = \sum_{i=1}^N (\zeta(t_i) - \bar{\zeta})^2.$$

Тогда условные плотности случайной величины  $u$  имеют вид  $\chi^2$ -распределений:

$$f\left(\frac{u}{S_1}\right) = [2\sigma_{\zeta 1}^N G\left(\frac{N}{2}\right)]^{-1} \left(\frac{u}{2}\right)^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma_{\zeta 1}^2}\right), \quad u > 0, \quad (3)$$

$$f\left(\frac{u}{S_2}\right) = [2\sigma_{\zeta 2}^N G\left(\frac{N}{2}\right)]^{-1} \left(\frac{u}{2}\right)^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma_{\zeta 2}^2}\right), \quad u > 0, \quad (4)$$

$$f\left(\frac{u}{S_3}\right) = [2\sigma_{\zeta 3}^N G\left(\frac{N}{2}\right)]^{-1} \left(\frac{u}{2}\right)^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma_{\zeta 3}^2}\right), \quad u > 0. \quad (5)$$

Пороги сравнения  $k_{12}$  и  $k_{13}$ , применяемые для интегрирования плотностей (3-5) при расчете вероятностей ошибок первого ( $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{13}$ ) и второго ( $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$ ) рода определяются неравенствами:

- $u \neq k_{12}$ , при использовании уравнения (1),

- $u \neq k_{13}$ , при использовании уравнения (2).

В этом случае:

$$k_{12} = \frac{2\sigma_{\zeta 1}^2 \sigma_{\zeta 2}^2}{\sigma_{\zeta 1}^2 - \sigma_{\zeta 2}^2} \ln\left[\left(\frac{\sigma_{\zeta 1}}{\sigma_{\zeta 2}}\right)^N\right],$$

$$k_{13} = \frac{2\sigma_{\zeta 1}^2 \sigma_{\zeta 3}^2}{\sigma_{\zeta 1}^2 - \sigma_{\zeta 3}^2} \ln\left[\left(\frac{\sigma_{\zeta 1}}{\sigma_{\zeta 3}}\right)^N\right].$$

Ошибки 1-го рода при классификации пограничных состояний  $S_1$ - $S_2$  или  $S_1$ - $S_3$  равны:

$$\alpha_{12} = \int_{k_{12}}^{\infty} f\left(\frac{u}{S_1}\right) du = 1 - \frac{G\left(\frac{N}{2}, \frac{k_{12}}{2\sigma_{\zeta 1}^2}\right)}{G\left(\frac{N}{2}\right)},$$

$$\alpha_{13} = \int_{k_{13}}^{\infty} f\left(\frac{u}{S_1}\right) du = 1 - \frac{G\left(\frac{N}{2}, \frac{k_{13}}{2\sigma_{\zeta 1}^2}\right)}{G\left(\frac{N}{2}\right)},$$

Ошибки второго рода рассчитываются соответственно, как:

$$\beta_{12} = \int_0^{k_{12}} f\left(\frac{u}{S_2}\right) du = \frac{G\left(\frac{N}{2}, \frac{k_{12}}{2\sigma_{\zeta 2}^2}\right)}{G\left(\frac{N}{2}\right)},$$

$$\beta_{13} = \int_0^{k_{13}} f\left(\frac{u}{S_3}\right) du = \frac{G\left(\frac{N}{2}, \frac{k_{13}}{2\sigma_{\zeta 3}^2}\right)}{G\left(\frac{N}{2}\right)}.$$

Полная вероятность ошибки при классификации состояний С и В при неопределенности их априорных вероятностей равна:

$$P_{CB} = 0.5(\alpha_{12} + \beta_{12}).$$

Полная вероятность ошибки при классификации состояний С и А равна:

$$P_{CA} = 0.5(\alpha_{13} + \beta_{13}).$$

Т.о., в данной статье изложен аналитический материал, относящийся к классификации состояния объекта контроля, а также к оценке погрешности определения нахождения рабочей точки  $\zeta_M$  в одной из областей разработанной классификации. Данные имитационного моделирования, осуществленные с применением пакета прикладных программ Mathematica 3.0, и данные натурного эксперимента в производственных условиях показал, что вероятности ошибок  $P_{CB}$  и  $P_{CA}$  практически не превышают величины 0.2 при различных дестабилизирующих факторах. В табл. даны вероятности полных ошибок классификации состояний объекта контроля при различных уровнях дестабилизирующих факторов, полученных путем имитационного моделирования.

Таблица

Вероятности полных ошибок при классификации состояний объекта контроля для различных уровней дестабилизирующих факторов

| υ                 | $P_{CB}$ | $P_{CA}$ |
|-------------------|----------|----------|
| 1-я неисправность | 0.18     | 0.11     |
| 2-я неисправность | 0.09     | 0.07     |
| 3-я неисправность | 0.07     | 0.03     |
| 4-я неисправность | 0.02     | 0.008    |

Следует отметить, что значение вероятностей ошибок (см. табл.) являются максимальными и характеризуют именно пограничные случаи, когда рабочая область располагается, фактически на нижней или верхней границах полосы неопределенностей. Такой случай мало типичен и характерен для задачи контроля стационарности процесса  $\zeta(t)$  [2]. Реальные ошибки классификации состояний еще меньше, особенно, если рабочая область целиком находится в одной из областей А, В или С.

**Список литературы:** 1.Валуйская О.Ю. Обработка вибросигналов с целью определения параметров для экспресс-диагностики топливной аппаратуры дизельных агрегатов // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. «Автоматика и приборостроение». – 2002. -Вып. , - С. . 2. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники. -М.: Советское радио, 1975. - 392с.

Поступила в редколлегию 14.03.03